

点目标的红外辐射特性测量方法

曹立华^{1,2}, 万春明¹, 张云峰², 李宁²

(1. 长春理工大学理学院 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 首先给出了红外辐射特性测量的基本原理, 对于点目标, 由于光学系统的衍射作用, 经过光学系统成像为一个弥散斑, 由于弥散的原因, 点目标的辐射特性测量精度一般都非常低, 针对这种情况, 提出了一种基于辐射能量守恒的点目标辐射特性测量优化算法, 给出了算法的具体原理和实现过程; 最后, 为了验证算法的有效性, 在实验室里利用平行光管和点目标模拟装置进行了点目标辐射特性测量实验, 并对试验结果进行了系统分析, 结果表明, 经过优化算法后, 点目标的辐射测量精度优于10%, 表明点目标辐射特性测量优化算法在实际应用中有很广泛的前景。

关键词: 红外辐射; 辐射特性测量; 点目标; 辐射能量守恒

中图分类号: TP732.2 文献标识码: A

Infrared radiation characteristic measure method of point target

CAO Li-Hua^{1,2}, WAN Chun-Ming¹, ZHANG Yun-Feng², LI Ning²

(1. Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Firstly, the basic principles infrared radiation characteristic measure was presented. Due to the diffraction effect of the optical system, point target's image is a dispersed spot. Point target radiation characteristic measurement accuracy is generally very low. View of this situation, one point target radiation characteristic measurement optimization algorithm based on radiation energy conservation was proposed, Specific principles and implementation process was given. Finally, point target radiation characteristic measurement experiment was done, and the results were analyzed. The results show that the point target radiation measurement optimization algorithm's accuracy is better than 10%, indicating that the point target radiation characteristic measurement optimization algorithm has large application prospects in practice.

Key words: infrared radiation, radiation characteristic measure, point target, radiation energy conservation

PACS: 87.64.Km

引言

随着红外物理的深入研究和红外技术应用的发展, 目前军事目标的红外辐射特性数据受到了越来越广泛的重视, 具体体现在: 它可为红外系统提高探测、定位、分类、识别、跟踪的精度提供基础数据; 为目标识别提供目标分类、识别和辨认所必需的图像和光谱特征库; 为红外系统仿真提供目标和背景生成的物理特征及数学模型; 在武器系统研制、红外制

导、红外隐身与反隐身技术以及空中目标如飞机、导弹等的预警、反导技术、弹道导弹的突防中, 起着至关重要的作用。因此目标的红外辐射特性测量技术研究成为目前靶场测量的研究热点之一^[1-2]。

在实际的靶场测量中, 空中飞行目标在距离相对于光学系统比较远时, 如本文进行辐射特性测量的目标一般在 1×10^3 km 左右, 其经过光学系统所成的像一般为点目标, 即其在探测器表面上实际像的面积小于探测器的一个像元的情况, 这时, 由于光

收稿日期: 2013-08-06, 修回日期: 2014-09-23

Received date: 2013-08-06, revised date: 2014-09-23

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(SKLLIM0901)

Foundation items: Supported by Funds of State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter(SKLLIM0901)

作者简介(Biography): 曹立华(1971-), 男, 吉林磐石人, 博士研究生、研究员。主要从事光电仪器总体设计、目标红外辐射特性测量等方面的研究。E-mail: ningli521@qq.com

学系统衍射的作用,其能量是弥散的,针对这种情况,应用传统的辐射特性测量方法,对其进行辐射特性测量时,会影响辐射特性测量的精度^[3],目前,国内外对此方面的研究并不多,因此本文在深入研究点目标成像的物理机理的基础上,提出了一种基于能量守恒的点目标辐射特性测量方法,给出了算法的具体原理和实现过程,并对算法进行了试验验证,结果表明,可以有效地提高点目标辐射特性测量的精度。

1 红外辐射特性测量原理

假设目标为面目标,红外辐射特性测量系统对目标进行测量的原理如图 1 所示。

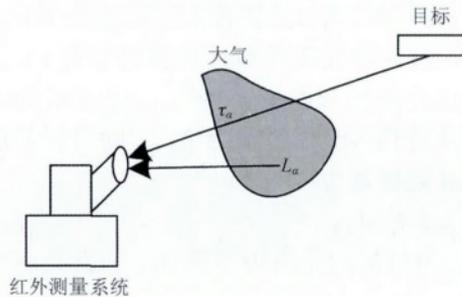


图 1 红外测量原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared measurement

红外系统的辐射响应度在线性模型下,如式所示。

$$DN = K \cdot L_r + DN_0 \quad (1)$$

其中 DN 为目标红外图像的灰度值; K 和 DN_0 是系统的响应函数的斜率和偏置; $L_r = \tau_a \cdot L_t + L_a$ 为观测系统入瞳辐射亮度; τ_a 和 L_a 分别为目标和观测系统之间的大气透过率和程辐射^[4,5]。

式(1)中, DN 为目标红外图像的灰度值,从保存的红外图像中可以得到; K 和 DN_0 在系统的辐射定标时已经得到; τ_a 和 L_a 在大气传输修正时已经得到; 只有目标的辐射亮度 L_t 为未知数,可以从式(1)中求出。反演计算过程分为如下两步:

第一步: 从红外图像的 DN 值得到系统的入瞳辐射亮度 L_r ; 为了计算方便,通常把 $DN = K \cdot L_r + DN_0$ 变形为:

$$L_r = a \cdot DN + b \quad (2)$$

第二步: 从入瞳辐射亮度,进行大气传输修正,得到目标的辐射亮度 L_t

$$L_t = (L_r - L_a) / \tau_a \quad (3)$$

其中目标辐射亮度 L_t 为表观辐射亮度,它包括了目标自身的辐射亮度 L_z ,以及天空背景辐射 L_{bk} 经目标表面反射到测量路径中的辐射亮度。在假设目标为灰体,同时发射率为 α_t 时,有如下表达式。

$$L_t = L_z + L_{bk}(1 - \alpha_t) \quad (4)$$

其中 L_t 为目标的表观辐射亮度; L_z 为目标真实的辐射亮度; L_{bk} 为天空的背景辐射; α_t 为目标的发射率。

要想计算出目标的真实辐射亮度,还必须知道天空背景辐射和目标的发射率等信息,天空背景辐射可以通过大气参数测量系统得到,但是在目标未知时,其发射率等特性是无法知道的,因此一般假设目标为黑体,或得到目标的表观辐射亮度^[6]。

根据目标的表观辐射亮度,通过普朗克公式可以求出目标的表观温度,即认为目标为黑体时,根据如下公式求出的表观温度。

$$L_t = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} C_1 \lambda^{-5} (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} d\lambda \quad (5)$$

其中 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为相机工作波段;

$$C_1 = (3.7415 \pm 0.0003) \times 10^8 \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4)$$

$C_2 = (1.43879 \pm 0.00019) \times 10^4 \text{ (}\mu\text{m}^4 \cdot \text{K)}$, T 为所求的目标表观温度(K)^[7]。

上述过程是假设目标为面目标,以目标的红外图像的灰度值为原始数据,通过红外测量系统的辐射响应度函数,得到目标入瞳处的辐射亮度,然后通过大气传输修正参数得到目标的表观辐射亮度,从而得到目标的表观温度。但是,当目标为点目标时,由于光学系统的衍射作用,目标为一个弥散斑,其灰度值会由于这种原因变低,而且这种变化是非确定性的,因此,通过上述方法得到目标的辐射亮度也是不确定的,这就引起辐射特性测量精度的严重降低。为此,本文提出了一种点目标辐射特性测量算法,解决由此产生的辐射特性测量误差。

2 点目标辐射特性测量

点目标成像关系示意图如图 2 所示。

设点目标的辐射亮度为 L_t ,面积为 A_t ,对于测量系统,点目标的成像投影面积非常小,光学系统入瞳接收到目标的辐射通量 ϕ 的大小为:

$$\phi = L_t \cdot A_t \cdot \Omega_d = L_t \cdot A_t \cdot \frac{A_d}{r^2} \quad (6)$$

其中 ϕ 为测量系统接收到的目标辐射通量(辐射功率); L_t 为目标的表观辐射亮度; A_t 为目标在测量方向上的投影截面积; Ω_d 为观测系统对目标所成的立体角; A_d 为观测系统的入瞳面积; r 为目标距离^[8-9]。

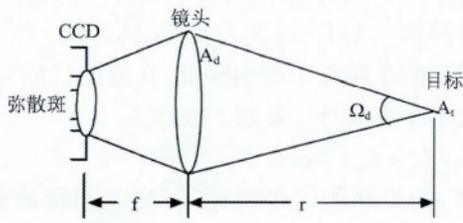


图2 点目标的成像示意图
Fig.2 Point target imaging diagram

点目标经过光学系统成像时,由于光学系统的衍射效应,会在红外焦平面阵列上形成一个弥散斑.对于红外焦平面阵列探测器的单个像元来说,通过辐射响应度函数反演得到的目标辐射度 L_{IC} ,会由于这种弥散效应与真实的 L_t 之间的误差比较大^[10],在对点目标进行红外辐射特性测量时,如果不进行修正,就会产生很大的反演误差.为此本文提出了一种针对点目标的优化算法.

2.1 点目标辐射测量的优化算法

从点目标成像的数学模型看,忽略光学系统的衰减,点目标形成弥散斑的辐射通量与其在光学系统入瞳处产生的辐射通量是相同的.同时,假设有一个虚拟的面目标,它经过光学系统成的像正好为弥散斑.这样,这个虚拟目标在光学系统入瞳处产生的辐射通量就等于点目标的入瞳辐射通量,如图3所示.

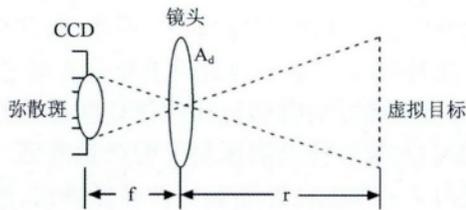


图3 模拟目标的成像示意图
Fig.3 Imaging schematic diagram of the simulated target

本文称为辐射能量守恒,并利用这个原理的点目标反演算法称为辐射能量守恒的点目标反演算法.假设虚拟目标在光学系统入瞳处产生的辐射量为:

$$\phi_f = \sum_{n=1}^{n=N} L_{pn} A_{pn} \frac{A_d}{r^2} \quad (7)$$

其中 L_{pn} 为每个像元对应的反演入瞳辐亮度, A_{pn} 为每个像元对应的假设目标的面积, A_d 为观测系统的入瞳面积, r 为目标的距离, N 为弥散斑红外图像对应的像素个数.根据辐射能量守恒,点目标入瞳

辐射量为虚拟目标入瞳辐射量,即:

$$\phi = \phi_f \quad (8)$$

$$L_t \cdot A_t \cdot \frac{A_d}{r^2} = \sum_{n=1}^{n=N} L_{pn} A_{pn} \frac{A_d}{r^2} \quad (9)$$

得到:

$$L_t = L_t \cdot A_t = \sum_{n=1}^{n=N} L_{pn} A_{pn} \quad (10)$$

其中 L_t 为点目标的辐射强度.在知道目标的真实截面积时,可以求出点目标辐亮度为:

$$L_t = \sum_{n=1}^{n=N} L_{pn} A_{pn} / A_t \quad (11)$$

其中 A_{pn} 为单个像元对应物方的投影面积, $A_{pn} = A_s r^2 / f^2$, A_s 为像元面积; f 为测量系统的焦距, L_{pn} 是第 n 个像素对应的点目标弥散后的辐亮度.假设点目标弥散斑对应的红外图像的灰度值为 $DN_{t,n}$,通过辐射响应度函数反演得到入瞳辐射量为 $L_{I_{反},n}$.背景对应的红外图像灰度值为 $DN_{bk,n}$,通过辐射响应度函数反演得到入瞳辐射量为 $L_{I_{反},n}$.则目标弥散后的反演入瞳辐射量为:

$$L_{pn} = L_{IC} - L_{bkC} \quad (12)$$

其中 L_{IC} 为目标的反演辐亮度; L_{bkC} 为背景的反演辐亮度.

假设测量系统第 n 个像元的辐射响应函数为:

$$L = a_n \cdot DN + b_n \quad (13)$$

其中 a_n 和 b_n 为第 n 个像素辐射响应函数的斜率和偏置.则有:

$$L_{pn} = a_n (DN_{t,n} - DN_{bk,n}) \quad (14)$$

综上所述,在目标截面积 A_t 未知的情况下,可以得到目标的辐射强度:

$$L_t = \sum_{n=1}^{n=N} a_n (DN_{t,n} - DN_{bk,n}) A_s \frac{r^2}{f^2} \quad (15)$$

在目标截面积已知的情况下,可以得到目标的辐亮度:

$$L_t = \sum_{n=1}^{n=N} a_n (DN_{t,n} - DN_{bk,n}) \frac{A_s r^2}{A_d f^2} \quad (16)$$

其中 N 为弥散斑对应红外图像的像素个数; $DN_{t,n}$ 为弥散斑第 n 个像素的灰度值; $DN_{bk,n}$ 为背景对应的灰度值.这样,就可通过对点目标的红外图像进行分析处理,从红外图像中提取出弥散斑对应的像素和灰度值,统计出背景的平均灰度值.然后根据上面的公式对目标的辐射强度和辐亮度进行反演计算,可提高对点目标的反演精度.下面给出点目标的红外提取算法.

2.2 点目标红外图像提取算法

下面给出点目标弥散斑的三维立体图.

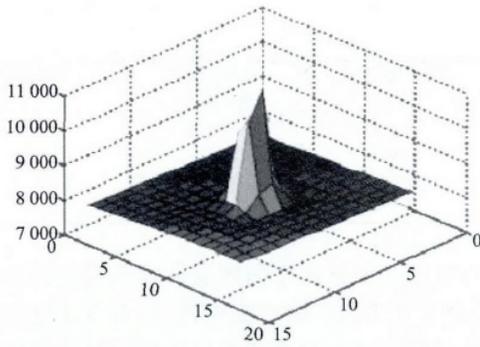


图4 弥散斑三维立体图

Fig. 4 Dispersed spot three-dimensional diagram of point target

从点目标弥散斑的三维立体图可以看出,能量产生一定的弥散. 根据点目标反演公式,首先,要得到背景的平均灰度值. 方法是在点目标附近选取一块背景相对均匀的区域,然后对这个区域的像素求平均值:

$$DN_{bk\ mean} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M DN_i, \quad (17)$$

其中 $DN_{bk\ mean}$ 为背景的平均灰度值; M 为选取区域的像素个数; DN_i 为选取区域的灰度值.

接下来就要得到目标弥散斑对应的红外像素位置和灰度值,方法是在点目标处选取一个小区域,这个区域包含点目标. 然后通过如下公式进行判断.

$$DN_i - DN_{bk\ mean} \geq th, \quad (18)$$

其中 DN_i 为选取的区域内的像素点的灰度值; th 为判断阈值. 满足条件的像素点,就是目标弥散斑的对应像素点.

同时用 $DN_{bk\ mean}$ 代替所有的 $DN_{bk\ n}$, 这样,就得到了点目标辐射特性测量优化方法里的所有未知参数. 然后通过公式(15)和(16),求得目标的红外辐射量.

3 辐射特性测量实验

为了验证上述点目标辐射特性处理优化方法的有效性和精度,在实验室内利用点目标模拟器和平行光管进行了点目标辐射特性测量模拟实验,试验原理如图5所示.

点目标模拟装置,是用腔型黑体和开小孔的靶面组成,放置在平行光管的焦平面处. 经平行光管准直后,形成平行光,然后通过测量系统的光学系统汇聚,在红外测量系统的焦平面处成像. 设定黑体的温度,待温度稳定后,存储红外图像,然后按照上述点目标辐射特性测量方法进行反演计算,结果与黑体

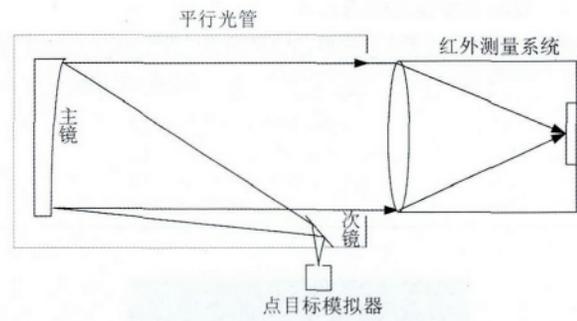


图5 点目标辐射特性测量试验的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of point target radiation characteristic measurement experiment

的真实辐射量进行比对,得出辐射特性测量的误差. 平行光管的透过率和背景辐射即可认为是大气透过率和程辐射,利用这两个参数可进行大气传输修正^[11],试验参数如表1所示.

表1 点目标辐射特性测量试验参数

Table 1 Point target radiation characteristics measured experiment parameters

参数	数值
波段	8~9.2 μm
平行光管焦距	7 m
大气透过率	0.793
程辐射	1.619 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$
探测器象元面积	30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$
焦距	2 m
物距	8 m
模拟点目标面积	0.2 mm \times 0.2 mm

4 实验结果与分析

试验获得的点目标红外图像如图6(a)所示,其对应的三维立体图如图6(b)所示. 模拟目标的靶面的开口是边长为0.02 mm正方形小孔,在物距为8 m时,其在探测器表面成像面积约为5 $\mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$,小于探测器一个像元的面积30 $\mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,满足点目标的假设. 从点目标的三维立体图也可以看出,模拟目标由于光学系统的弥散作用,确实产生了弥散,点目标的能量扩散成一个弥散斑.

应用本文点目标辐射特性测量算法,得到试验数据和处理结果如表2和表3所示.

表2为辐射强度的反演结果,表3为辐亮度的反演结果. 表2中给出了点目标红外图像的平均灰度值和背景的平均灰度值,然后根据第3节中点目标处理的算法,得到点目标的反演辐射强度值,与真实的黑体辐射强度值进行比较,可以看出,在本文的实验条件下,利用本文的点目标反演算法的反演精

表2 辐射强度反演结果分析

Table 2 Long-wave radiation intensity inversion results analysis

黑体的温度 ($^{\circ}\text{C}$)	实际辐射强度 ($\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	弥散斑像素个数	弥散斑平均 灰度值	背景平均灰度值 ($D N_{bk \text{ mean}}$)	反演辐射强度 ($\text{W} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	反演误差 (%)
93	1.240×10^{-6}	13	17 115	14 615	1.126×10^{-6}	9.1
146	2.216×10^{-6}	15	19 796	14 945	2.023×10^{-6}	8.7
188	3.192×10^{-6}	15	23 179	14 837	3.060×10^{-6}	4.1
205	3.633×10^{-6}	16	23 383	15 398	3.780×10^{-6}	4.0

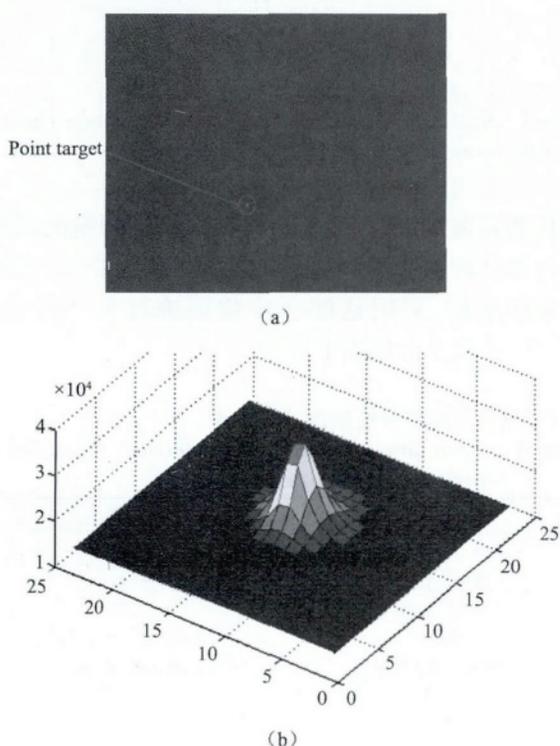


图6 长波红外试验数据 (a) 长波红外试验图像, (b) 点目标的三维图像

Fig. 6 Long-wave infrared experiment data (a) long-wave infrared image, (b) three-dimensional image of point target

表3 辐亮度反演结果分析

Table 3 Long-wave radiance inversion results analysis

黑体温度 ($^{\circ}\text{C}$)	实际辐亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	反演辐亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	反演误差 (%)
93	31.018	28.150	9.1
146	55.390	50.575	8.7
188	79.795	76.500	4.1
205	90.835	94.500	4.0

度优于10%。本文中,目标的截面积已知,因此目标的反演辐亮度的精度与辐射强度反演精度相同。

5 结论

在给出基于面目标的辐射特性测量原理的基础上,分析了点目标成像的物理过程,由于光学系统的衍射作用,点目标的像的能量与目标能量不是对应的,而是一个弥散的能量斑,这样通过面目标的辐射特性测量方法进行辐射特性测量的精度就非常低。

本文提出的基于能量守恒的点目标辐射特性测量算法,给出了算法的具体实现原理,并对算法进行了试验验证,结果表明,本文的点目标反演算法的精度优于10%,算法具有很高的可行性。

References

- [1] Liu R W, Kong Y M, Jiao B B, et al. A substrate-free optical read out focal plane array with a heat sink structure [J]. *Journal of semiconductor*, 2013, **34**(2): 1-6.
- [2] LIN Liang-Kui, XIE Kai, XU Hui, et al. Research on in-far-red imaging simulation of midcourse ballistic object target-complex [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (林两魁, 谢恺, 徐晖, 等. 中段弹道目标群的红外成像仿真研究. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(3): 218-223.
- [3] WANG R, SONG K F. High accuracy radiance calibration system for ultraviolet detector [J]. *Optics and Precision Engineering*, (王锐, 宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统. *光学精密工程*) 2009, **17**(3): 469-474.
- [4] Chang P, Li C R, Li T M. Kinematic calibration and forecast error compensation of a 2-DOF planar parallel manipulator [J]. *CHINESE JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING*, 2011, **24**(6): 992-998.
- [5] LI Ning, YANG Ci-Yin, CAO Li-Hua, et al. Radiance calibration for 3 ~ 5 μm infrared focal plane array [J]. *Optics and Precision Engineering* (李宁, 杨词银, 曹立华, 等. 3 ~ 5 μm 红外焦平面阵列的辐射定标. *光学精密工程*) 2011, **19**(10): 2319-2325.
- [6] Li L N, Wu C Q. Design of diode type uncooled infrared focal plane array readout circuit [J]. *Journal of Electronic Science and Technology* 2012, **10**(4): 309-313.
- [7] Cao L H, Li N, Yang C Y, et al. Radiance calibration for 3-5 μm infrared detector [J]. *Infrared and Laser Engineering* (曹立华, 李宁, 杨词银, 等. 3 ~ 5 μm 红外探测器的辐射定标. *红外与激光工程*) 2012, **41**(4): 858-864.
- [8] SUN Xue-Jin, LIU Jian, MAO Jie-Tai. Vicarious calibration on the sensor of whole sky infrared cloud measuring system [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (孙学金, 刘剑, 毛节泰. 全天空红外测云系统辐射传感器的替代定标. *红外与毫米波学报*) 2009, **28**(1): 55-57.
- [9] Wang D, Wu Y. Array errors active calibration algorithm and its improvement [J]. *SCIENCE CHINA Information Sciences* 2010, **53**(5): 1016-1033.
- [10] YU L, LIN G Y, CHEN B. Study on the Absolute Spectral Irradiation Calibration Method for Far Ultraviolet Spectrometer in Remote Sensing [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2013, **33**(1): 246-249.
- [11] YANG Ci-Yin, ZHANG Jian-Ping, CAO Li-Hua. Infrared radiation measurement based on real-time correction [J]. *J. Infrared Millim. Wave* (杨词银, 张建萍, 曹立华. 基于实时标校的目标红外辐射测量新方法. *红外与毫米波学报*) 2011, **30**(3): 284-288.